

Программные системы и вычислительные методы

Правильная ссылка на статью:

Филиппова К.А., Аюшеев Т.В., Дамдинова Т.Ц., Цыдыпов Ц.Ц. Исследование напряженно-деформированного состояния композитной лопасти в ANSYS WorkBench // Программные системы и вычислительные методы. 2024. № 2. DOI: 10.7256/2454-0714.2024.2.70712 EDN: XDTLCG URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=70712](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=70712)

## Исследование напряженно-деформированного состояния композитной лопасти в ANSYS WorkBench

**Филиппова Ксения Анатольевна**

старший преподаватель; кафедра "Самолето- вертолетостроение"; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670013, Россия, республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В

✉ [ipq84@mail.ru](mailto:ipq84@mail.ru)



**Аюшеев Тумэн Владимирович**

доктор технических наук

доцент; кафедра "Инженерная и компьютерная графика"; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670013, Россия, Бурятия область, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В

✉ [atv62@bk.ru](mailto:atv62@bk.ru)



**Дамдинова Татьяна Цыбиковна**

ORCID: 0000-0002-3597-3262

кандидат технических наук

доцент; кафедра "Инженерная и компьютерная графика"; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670000, Россия, республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В

✉ [dtatyanac@mail.ru](mailto:dtatyanac@mail.ru)



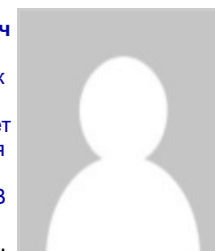
**Цыдыпов Цыбик Цырендоржиевич**

кандидат технических наук

доцент; кафедра "Самолето- вертолетостроение"; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670013, Россия, Бурятия область, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В

✉ [sssibik@mail.ru](mailto:sssibik@mail.ru)



---

[Статья из рубрики "Математическое моделирование и вычислительный эксперимент"](#)

**DOI:**

10.7256/2454-0714.2024.2.70712

**EDN:**

XDTLCG

**Дата направления статьи в редакцию:**

12-05-2024

**Дата публикации:**

25-05-2024

**Аннотация:** В настоящей работе был выполнен расчет статической прочности лопасти БПЛА из композиционного материала. Композиционные материалы имеют преимущество над традиционными материалами (металлами и сплавами) в области авиации - выигрыш в весе, низкая чувствительность к повреждениям, высокая жесткость, высокие механические характеристики. При этом определение уязвимых мест в слоистой конструкции является сложной задачей и на практике решается с помощью разрушающего контроля. При моделировании были использованы композитные материалы, имеющиеся в библиотеке материалов ANSYS: Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg тканый углепластик в виде препрега – полуфабриката, пропитанной эпоксидной смолой углеткани с модулем Юнга  $E=230$  ГПа и Epoxy Carbon (230 GPa) Prepreg однонаправленный углепластик-препрег, пропитанный эпоксидной смолой с модулем Юнга  $E=230$  ГПа. Комплексно исследовать слоистую конструкцию позволяют современные программные продукты, такие как, ANSYS WorkBench. Были исследованы несколько вариантов конструкций лопасти с разными наполнителями в качестве срединного материала. Был использован прямой и обратный критерий разрушения на основе теории Цая-Хилла. Влияние силы тяжести не учитывалось. Показано, что разработанная конструкция лопасти соответствует предъявляемым требованиям. В качестве срединного материала лопасти были выбраны материалы - древесина бальзы, сосны, осины и пенополиуретан. Древесина сосны и осины были выбраны по критерию их доступности и имеющие наименьшую плотность. В библиотеке материалов используемого программного комплекса ANSYS WorkBench имеются характеристики не на все из них, поэтому характеристики выбранных материалов (сосны и осины) были добавлены вручную. Для моделирования и расчетов в программе ANSYS WorkBench необходимы такие характеристики как плотность, модули упругости по осям, коэффициенты Пуассона, модули сдвига и пределы прочности при растяжении и сжатии.

**Ключевые слова:**

композиционный материал, лопасть, статическая прочность, ANSYS WorkBench, напряжение, критерий разрушения, теории Цая-Хилла, углеткань, стеклопластик, срединные наполнители

*Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки Республики Бурятия (соглашение № 413 от 21.12.2023 г.).*

**Введение**

Композиционные материалы имеют преимущество над традиционными материалами (металлами и сплавами) в области авиации - выигрыш в весе, низкая чувствительность к повреждениям, высокая жесткость, высокие механические характеристики. При этом определение уязвимых мест в слоистой конструкции является сложной задачей и на практике решается с помощью разрушающего контроля. Комплексно исследовать слоистую конструкцию позволяют современные программные продукты, такие как, ANSYS WorkBench.

Тема настоящей работы является актуальной, вычислительные мощности современных компьютеров позволяют проводить исследования все более сложных деталей и систем, производить анализ и подбор состава композиционных материалов и конструкций лопасти воздушного винта. В исследовании [1] рассматривается лопасть вертолета, которая имеет отличную от рассматриваемой конструкцию лопасти, в работе [2] рассматривается конструкция лопасти, содержащая в себе лонжерон в виде многослойной стеклопластиковой трубы, и сотовый наполнитель. В исследовании [3] проведены стендовые испытания по определению разрушающей нагрузки, выявлены особенности характера разрушения комлевой части, что подтверждают полученные результаты численного исследования в настоящей работе, приведенные в выводах.

### **Задачи исследования**

1. Провести оценку напряженного-деформированного состояния (НДС) композитной лопасти с классической сборкой: срединный материал – бальза, сверху уложены слои однонаправленного углепластикового препрега под углом  $0^0$ , углеткань под углом  $-45^0$ , углеткань под углом  $45^0$ .
2. Рассмотреть и рассчитать НДС лопасти с другими типами срединного материала: сосна, осина, а также пенополиуретан.
3. Рассмотреть и рассчитать НДС лопасти с гибридным композиционным материалом: однонаправленный стеклопластиковый препрег под углом  $0^0$ , углеткань под углом  $-45^0$ , углеткань под углом  $45^0$ .
4. Провести оценку запаса прочности по критерию разрушения Цая –Хилла.

### **Материалы и методы**

Исследуемая лопасть БПЛА представляет собой сэндвич конструкцию, внутри которой находится срединный материал - бальза, на верхней части бальзы уложены слои снизу вверх: слой однонаправленного углепластика под углом  $0^0$  и два слоя тканого углепластика под углами  $-45^0$ ,  $45^0$ . На нижней поверхности бальзы укладка выполняется аналогично. Толщина композиционного тканого слоя 0,16 мм, толщина композиционного однонаправленного слоя 0,08. Максимальная длина образца 304,81 мм, ширина образца варьируется от 15,26 мм до 52 мм. Крепление лопасти консольное. На исследуемый образец действуют центробежная сила  $F_{цб}$  и подъемная сила  $F_{под}$ .

Расчет нагрузки проводился следующим образом:

$$F_{цб} = m_l \cdot \omega^2 \cdot R,$$

$$F_{под} = m_{взл} \cdot k,$$

где масса лопасти  $m_l = 0,06$  кг,

угловая скорость лопасти  $\omega = 6000$  об/мин,  
радиус вращения винта  $R = 300$  мм,  
взлетная масса БПЛА  $m_{взл} = 25$  кг,  
коэффициент запаса  $k = 1,5$ .

По итогам расчета получены следующие данные:

$$F_{цб} = 3553,058 \text{ Н};$$
$$F_{под} = 367,5 \text{ Н}.$$

При моделировании были использованы композитные материалы, имеющиеся в библиотеке материалов ANSYS: Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg тканый углепластик в виде препрега – полуфабриката, пропитанной эпоксидной смолой углеткани с модулем Юнга  $E=230$  ГПа и Epoxy Carbon (230 GPa) Prepreg однонаправленный углепластик-препрег, пропитанный эпоксидной смолой с модулем Юнга  $E=230$  ГПа. Характеристики бальзы, сосны, осины и пенополиуретана в библиотеке материалов отсутствуют, поэтому характеристики [4] были добавлены вручную, такие как плотность, модули упругости по осям, коэффициенты Пуассона, модули сдвига и пределы прочности при растяжении и сжатии (табл. 1, 2)

Таблица 1 – Характеристики древесных материалов

Характеристики срединного материала	Бальза		Сосна		Осина	
 Density	160	kg m <sup>-3</sup>	520	kg m <sup>-3</sup>	395	kg m <sup>-3</sup>
 Orthotropic Elasticity						
Young's Modulus X direction	15	GPa	11,9	GPa	12,8	GPa
Young's Modulus Y direction	10	GPa	0,67	GPa	1	GPa
Young's Modulus Z direction	10	GPa	0,55	GPa	1	GPa
Poisson's Ratio XY	0,3		0,3		0,3	
Poisson's Ratio YZ	0,3		0,3		0,3	
Poisson's Ratio XZ	0,3		0,3		0,3	
Shear Modulus XY	1	GPa	1,23	GPa	1	GPa
Shear Modulus YZ	1	GPa	0,76	GPa	0,7	GPa
Shear Modulus XZ	1	GPa	0,5	GPa	0,7	GPa
 Tensile Yield Strength	30	MPa	90	MPa	121	MPa
 Compressive Yield Strength	50	MPa	43	MPa	43	MPa

Таблица 2 – Характеристика пенополиуретана

Характеристики срединного материала	Пенополиуретан	
 Density	50	kg m <sup>-3</sup>
 Isotropic Elasticity		

Orthotropic Stress Limits		
Tensile X direction	0,5	MPa
Tensile Y direction	0,5	MPa
Tensile Z direction	0,8	MPa
Compressive X direction	-0,05	MPa
Compressive Y direction	-0,05	MPa
Compressive Z direction	-0,07	MPa
Shear XY	0,18	MPa
Shear YZ	0,18	MPa
Shear XZ	0,18	MPa

В ANSYS Workbench импортируется модель, состоящая из лопасти и бальзы в формате Parasolid, построенная в программном комплексе NX. Импортированная модель представлена на рисунке 1.

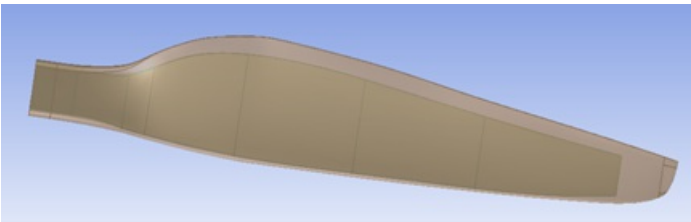


Рисунок 1 – Импортированная модель лопасти и бальзы

Модель разбивается сеточным генератором на сетку конечных элементов, в качестве параметра выбран размер элементов 1 мм.

Задается укладка композиционного материала сверху вниз (Top - Down), слои моделируются по следующим ориентациям по углам укладки: 45<sup>0</sup>, -45<sup>0</sup>, 0<sup>0</sup>(рис. 2).



Рисунок 2 – Схема укладки композитной лопасти

Задаются граничные условия на комлевую часть (из-за симметрии исследуем только половину лопасти) - консольная заделка (запрет перемещений по всем осям). К центру масс прикладывается центробежная сила Fцб. Равномерно задается подъемная сила Fпод по нижней поверхности лопасти по линии ¼ хорд лопасти.

По аналогии смоделированы и исследованы варианты лопасти с другими срединными материалами: сосна, осина, пенополиуретан, и рассмотрен вариант лопасти с однонаправленным стеклопластиковым препрегом вместо однонаправленного углепластикового препрега ориентированного под углом 0<sup>0</sup>.

**Результаты**

Полученные результаты исследования НДС лопасти из углепластика представлены в таблице 3, НДС лопасти из стекло-углепластика в таблице 4, визуализация исследования

НДС лопасти приведена на рисунке 3. Максимальные деформации лопасти приведены в виде гистограммы для сравнительного анализа (рис. 4).

Таблица 3 - Расчет НДС углепластиковой лопасти: полная деформация, деформации по осям X, Y, Z

Срединный материал	Максимальная деформация, мм	Деформация по оси X, мм	Деформация по оси Y, мм	Деформация по оси Z, мм
Бальза	0,72409	0,18478	0,008113	0,087863
Сосна	0,83737	0,20401	0,0090682	0,096759
Осина	0,82147	0,19924	0,0088863	0,094065
Пенополиуретан	1,7645	0,39324	0,021362	0,33716

Таблица 4 - Расчет НДС стекло-углепластиковой лопасти: полная деформация, деформации по осям X, Y, Z

Срединный материал	Максимальная деформация, мм	Деформация по оси X, мм	Деформация по оси Y, мм	Деформация по оси Z, мм
Бальза	0,81438	0,2139	0,010093	0,077528
Сосна	0,94891	0,23745	0,01126	0,082537
Осина	0,93103	0,23106	0,010965	0,080557
Пенополиуретан	1,9255	0,47155	0,02847	0,32144

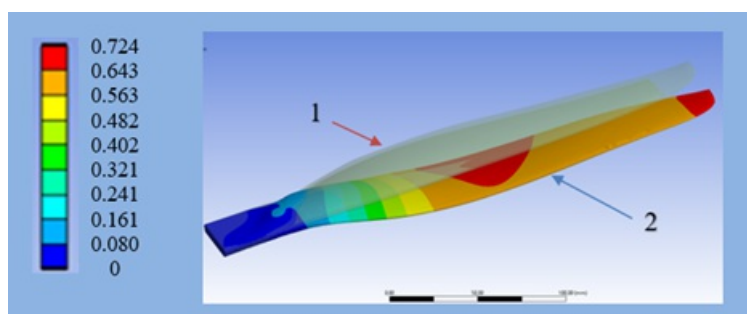


Рисунок 3 - Деформация (мм) углепластиковой лопасти (срединное тело – бальза).

1 - Исходное положение лопасти, 2 - Деформированная лопасть

Существенной особенностью оценки несущей способности композитных конструкций является послойный анализ НДС композитной конструкции, который заключается в анализе НДС каждого слоя. В настоящей работе был произведен анализ послойно: определены максимальные и минимальные напряжения, а также получено отображение уязвимых мест в каждом слое.

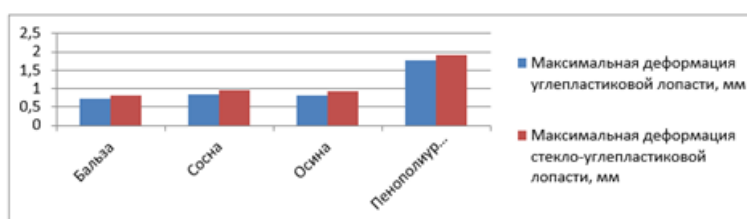


Рисунок 4 - Максимальные деформации лопасти

Полученные результаты послойного исследования для углепластиковой лопасти

представлены в таблице 5 и на рисунках 5-7, для стекло-углепластиковой лопасти в таблице 6. Для удобства использовалась кодировка слоев: слой 1 – слой, ориентированный под углом  $45^0$ , слой 2 – слой, ориентированный под углом  $-45^0$ , слой 3 – слой, ориентированный под углом  $0^0$ .

Таблица 5 – Максимальные и минимальные напряжения послойно для углепластиковой лопасти

Срединный материал	НДС лопасти, $\sigma$ макс / $\sigma$ мин (Мпа)		
	Слой 1 (Углеткань)	Слой 2 (Углеткань)	Слой 3 (Однонапр.углепластик.)
Бальза	68,88 / -24,365	67,072 / -61,839	266,39 / -28,567
Сосна	71,086 / -26,369	73,13 / -69,699	290,04 / -31,634
Осина	70,08 / -26,189	71,786 / -66,848	282,16 / -31,896
Пенополиуритан	123,79 / -43,03	123,85 / -142,67	526,16 / -78,56

Таблица 6 – Максимальные и минимальные напряжения послойно для стекло-углепластиковой лопасти

Срединный материал	НДС лопасти, $\sigma$ макс / $\sigma$ мин (Мпа)		
	Слой 1 (Углеткань)	Слой 2 (Углеткань)	Слой 0 (Однонапр.стеклопластик)
Бальза	81,52 / -25,988	61,191 / -49,038	71,009 / -9,9571
Сосна	85,61 / -28,371	62,207 / -54,558	76,645 / -11,09
Осина	84,009 / -28,149	65,716 / -53,126	74,83 / -11,111
Пенополиуритан	145,28 / -45,175	125,4 / -133,25	139,31 / -22,375

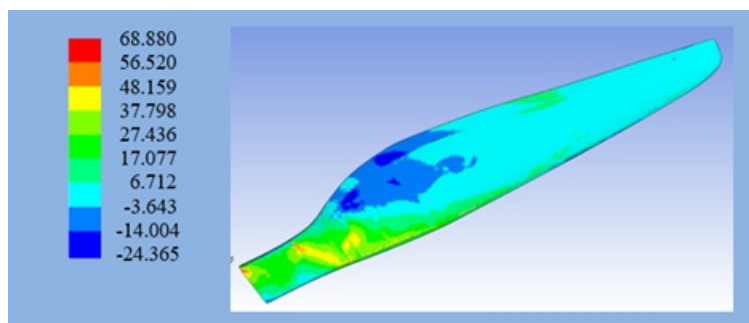


Рисунок 5 – Картина напряжений (МПа) в слое 1 (под углом  $45^0$ ) углепластиковой лопасти (срединное тело – бальза)

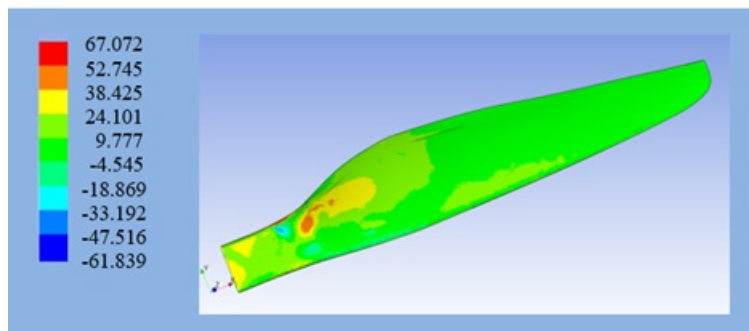


Рисунок 6 – Картина напряжений (МПа) в слое 2 (под углом  $-45^0$ ) углепластиковой лопасти (срединное тело – бальза)

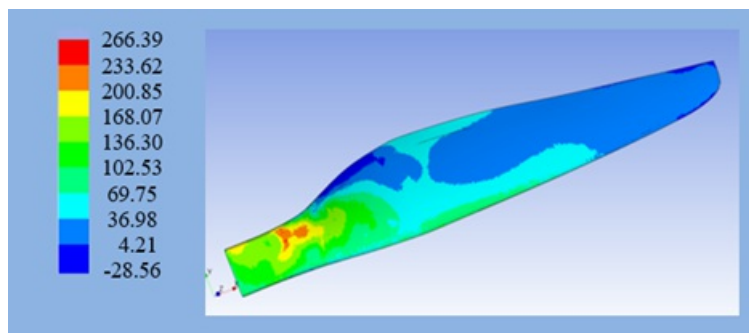


Рисунок 7 – Картина напряжений (МПа) в слое 3 (под углом  $0^0$ ) углепластиковой лопасти (срединное тело – бальза)

Для оценки прочности был использован обратный коэффициент запаса прочности, который показывает во сколько раз действующие напряжения меньше допускаемых [5].

Разрушение возникает при  $IRF > 1$ .

$$IRF = \frac{1}{RF},$$

где  $RF$  - коэффициент запаса прочности, определяется как отношение разрушающей нагрузки к приложенной нагрузке.

Критериев прочности для композитов разработано достаточно много [6,7] и каждый из них отражает те или иные особенности разрушения. Вышеуказанный коэффициент запаса прочности основан на критерии Цая-Хилла, который представляет собой аналитическую аппроксимацию результатов испытаний однонаправленного слоя при различных видах нагружения. Данный критерий имеет следующий вид:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2} + \left(\frac{\sigma_2}{\bar{\sigma}_2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\bar{\tau}_{12}}\right)^2 \leq 1$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{12}$  – нормальные и касательные напряжения,

$\bar{\sigma}_1$ ,  $\bar{\sigma}_2$ ,  $\bar{\tau}_{12}$  – их предельные значения.

В таблице 7 приведены обратные коэффициенты запаса прочности для углепластиковой лопасти с разными вариантами срединного материала, в таблице 8 приведены обратные коэффициенты запаса прочности для стекло-углепластиковой лопасти с разными вариантами срединного материала (курсивом выделено значение коэффициента,



превышающего допусковые напряжения, визуализация этого значения приведена на рисунке 8).

Таблица 7 – Сводная таблица IRF по слоям углепластиковой лопасти с разными вариантами срединных материалов

Углепластиковая лопасть, срединный материал	Номер самого напряженного слоя	Максимальный коэффициент IRF
Бальза	3	0,58
Сосна	3	0,65
Осина	3	0,63
Пенополиуретан	3	<b>1,38</b>

Таблица 8 – Сводная таблица IRF по слоям стекло-углепластиковой лопасти с разными вариантами срединных материалов

Стекло-углепластиковая лопасть, срединный материал	Номер самого напряженного слоя	Максимальный коэффициент IRF
Бальза	1	0,13
Сосна	1	0,14
Осина	1	0,15
Пенополиуретан	1	0,38

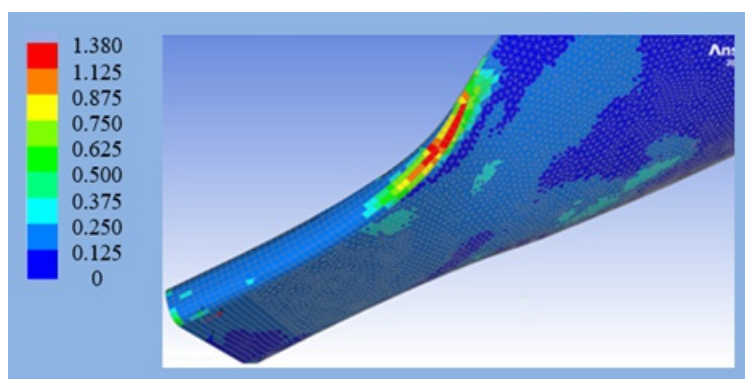


Рисунок 8 – Углепластиковая лопасть (срединное тело – пенополиуретан).

IRF в самом напряженном слое углепластика (слой 3)

### Выводы

1. Проведена оценка НДС композитной лопасти с классической сборкой: срединный материал – бальза, сверху уложены слои однонаправленного углепластикового препрега под углом  $0^0$ , углеткань под углом  $-45^0$ , углеткань под углом  $45^0$ .

Срединный материал – бальза, является оптимальным вариантом по показателям максимальных деформаций, деформаций по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

2. Рассчитано НДС лопасти с другими типами срединного материала: сосна, осина, пенополиуретан.

Среди рассматриваемых срединных материалов наихудшим вариантом является

пенополиуретан. Показатели по максимальной деформации лопасти с пенополиуретаном превышают аналогичный показатель лопасти с бальзой в 2,4 раза.

Разница по деформациям между лопастью с бальзой и лопастью с осиной или сосной в качестве срединного материала, составляет не более 15 %, что является удовлетворительным результатом, учитывая стоимость и труднодоступность материала бальзы, в отличие от распространенных сосны и осины.

3 . Рассчитано НДС лопасти с гибридным композиционным материалом: однонаправленный стеклопластиковый препрег под углом  $0^0$ , углеткань под углом  $-45^0$ , углеткань под углом  $45^0$ .

Композиционный материал послойно работает и на растяжение. и на сжатие. Оптимальным вариантом срединного материала является бальза, однако ухудшение механических характеристик (напряжения при растяжении, сжатии) по слоям для материалов сосна и осина не превышает 20%, что является удовлетворительным результатом, учитывая стоимость и труднодоступность материала бальзы, в отличие от распространенных сосны и осины.

4. Проведена оценка запаса прочности всех вариантов лопасти.

Анализ самых напряженных участков послойно выявил, что прочность лопасти не обеспечивается при варианте: углепластиковая лопасть, срединный материал – пенополиуретан. В слое под углом  $00$  возникает участок с коэффициентом  $IRF = 1,38$ , что превышает допускаемое напряжение на 38%.

Нагрузка, вызвавшая разрушение волокон в каком-либо слое композитной конструкции, считается предельной для всей конструкции. Это позволяет определить максимально возможную несущую способность исследуемой композитной конструкции. Таким образом, оценка НДС конструкции из слоистого КМ базируется на оценке НДС однонаправленного слоя. Необходимо учесть, что полученные результаты моделирования нуждаются в экспериментальной проверке.

Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки Республики Бурятия (соглашение № 413 от 21.12.2023 г.).

## **Библиография**

1. Фэн, Г. Исследование статической прочности композитной лопасти вертолета / Г. Фэн, А. М. Думанский, А. Н. Русланцев // Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций: Труды Второй международной конференции, Москва, 18–20 октября 2016 года. – С. 196-198.
2. Сидоров, И. Н. Расчет напряженно-деформированного и предельного состояний композитной лопасти несущего винта вертолета при различных режимах полета с учетом повреждений в комлевом сечении / И. Н. Сидоров, А. В. Горелов, Е. И. Николаев // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов, Казань, 20–24 августа 2015 года. – С. 3453-3457.
3. Бурцев, Б. Н. Особенности напряженно-деформированного состояния комлевой части лопасти несущего винта / Б. Н. Бурцев, Н. П. Тютюнников // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 552-561.
4. Глебов, И. Т. Физика древесины: учебное пособие / И. Т. Глебов. — Екатеринбург : УГЛУ, 2018. — 80 с.
5. Первушин, Ю. С., Жернаков, В. С. Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий

из слоистых композиционных материалов: учеб. пособие / Ю. С. Первушин, В. С. Жернаков; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа. 2008. –303с.

6. Хилл, Р. Теория механических свойств волокнистых композиционных материалов // Механика / Сб. переводов. 1966. № 2. С. 131 - 149.

7. Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев. - Москва : Машиностроение, 1988. - 271 с.

## Результаты процедуры рецензирования статьи

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Статья посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) композитной лопасти с различными срединными материалами, такими как бальза, сосна, осина и пенополиуретан, с использованием программного продукта ANSYS WorkBench. Это важная и актуальная тема в области материаловедения и авиационной инженерии, поскольку композитные материалы становятся все более востребованными благодаря своим преимуществам перед традиционными материалами.

Авторы провели численное моделирование НДС лопасти с разными типами срединных материалов, используя методы конечных элементов в ANSYS WorkBench. В работе подробно описан процесс моделирования, включая геометрические параметры, материалы и условия нагружения. Это позволяет воспроизвести исследование и проверять его результаты на практике.

Актуальность работы обусловлена возрастающим использованием композитных материалов в авиационной промышленности. Композиты обеспечивают значительное уменьшение веса конструкций при сохранении или улучшении их механических характеристик. В этом контексте исследование НДС композитной лопасти имеет большое значение для разработки и оптимизации авиационных компонентов.

Научная новизна статьи заключается в комплексном подходе к исследованию НДС композитной лопасти с разными типами срединных материалов и гибридными композитами. Авторы впервые проводят детализированный анализ влияния различных срединных материалов на НДС лопасти, что позволяет определить оптимальные сочетания для достижения наилучших характеристик прочности и жесткости.

Статья написана в научном стиле, логично структурирована и последовательно излагает материал. Введение четко определяет цели и задачи исследования. Основная часть содержит подробное описание методологии и результатов, подкрепленное иллюстрациями и таблицами, что облегчает восприятие и анализ данных. Выводы обоснованы и подтверждены результатами численного моделирования.

Исследование показало, что наиболее оптимальным срединным материалом для композитной лопасти является бальза, обеспечивающая наилучшие показатели НДС. Лопасты с пенополиуретаном показали худшие результаты, что делает этот материал менее предпочтительным. Анализ гибридных композитов также выявил значительные преимущества использования бальзы по сравнению с сосной и осиной.

Статья представляет интерес для ученых и инженеров, работающих в области материаловедения, авиационной и машиностроительной промышленности. Исследование содержит ценные данные и методики, которые могут быть использованы для дальнейших исследований и практического применения в разработке и оптимизации композитных конструкций.

Статья является важным вкладом в область исследования композитных материалов и их применения в авиации. Она содержит значительные теоретические и практические результаты, которые могут быть полезны для научного сообщества и индустрии.

Для дальнейшего развития данной работы можно предложить несколько направлений. В первую очередь следует провести лабораторные испытания исследованных композитных лопастей для подтверждения численных данных. Экспериментальные результаты позволят проверить адекватность используемой модели и уточнить ее параметры. Кроме того, важно рассмотреть возможность использования других видов композитных материалов, таких как углеродно-кевларовые и углеродно-базальтовые композиты. Сравнение их характеристик с уже исследованными материалами может выявить дополнительные преимущества.

Анализ динамического поведения композитных лопастей при воздействии различных нагрузок, включая вибрационные и ударные нагрузки, также является важным направлением. Это поможет определить долговечность и надежность лопастей в реальных эксплуатационных условиях. Следует применить методы оптимизации для улучшения конструкции лопасти, что может включать изменение формы, размера и расположения слоев композита для достижения наилучших показателей прочности и жесткости при минимальном весе.

Не менее значимым является изучение поведения композитных лопастей при различных условиях эксплуатации, таких как экстремальные температуры, влажность и воздействие агрессивных сред. Это поможет оценить долговечность и устойчивость материалов в различных климатических условиях. Важно также провести моделирование распространения трещин и повреждений в композитных лопастях. Это позволит разработать методы раннего выявления и предотвращения разрушений, что повысит надежность и безопасность эксплуатации.

Экономический анализ применения различных композитных материалов, учитывающий стоимость материалов, технологии производства и эксплуатационные расходы, также необходим. Это поможет выбрать оптимальное решение с точки зрения затрат и эффективности. На основе полученных данных и анализа следует разработать рекомендации по производству композитных лопастей, включая выбор материалов, методы укладки и технологические параметры. Это поможет улучшить качество и снизить стоимость производства.